

4.Дорошенко В.И. Математическое моделирование процессов комбинированной вытяжки. – Луганск: ДНУ им. В.Даля, 2003. –136 с.

*Получено 09.12.2008*

УДК 693.54

Т.С.СЕНЧУК, Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **РЕЗЕРВИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ**

Рассматривается резервирование, т.е. прокладка дополнительных трубопроводов параллельно основному как способ повышения функциональной надёжности всей системы.

Наиболее распространенным методом, обеспечивающим возможность проведения работ по реновации трубопровода повышенной протяженности без прерывания транспорта целевого продукта потребителю, является резервирование, т.е. прокладка дополнительных трубопроводов параллельно основному. При этом система запорной арматуры должна обеспечить функциональную независимость всех трубопроводов: перевод любого трубопровода в режим проведения профилактических работ не должен влиять на транспортировку целевого продукта по остальным трубопроводам. Такой метод позволяет при проведении профилактических или аварийных работ не только сохранить основное назначение системы (транспортировать целевой продукт), но и повысить функциональную надёжность всей системы.

В большинстве случаев при резервировании ограничиваются сооружением одного дополнительного трубопровода. Как правило, сооружение двух параллельных трубопроводов позволяет решить проблему больших расстояний. Анализ экономической эффективности показывает, что сооружение третьего, а тем более четвёртого, пятого и т.д., трубопровода нецелесообразно: незначительное увеличение функциональной надёжности системы приводит к неоправданным материальным и трудовым затратам. Исключением, пожалуй, является случай, когда параллельные трубопроводы обеспечивают пропускную способность.

В существующих подходах проблема расчета функциональной надёжности магистрального трубопровода освещается в работах [1-3]. Анализ этих и других источников по данной проблеме свидетельствует, что процесс определения вероятности функциональной надёжности трубопровода не является полностью определенным, а дает только

оценку сверху и снизу расчета вероятности.

Целью настоящей работы является рассмотрение метода резервирования для повышения функциональной надёжности всей системы путем построения схемы магистральной трубопроводной системы, состоящей из одного, двух или более параллельных трубопроводов с задвижками.

Схема простейшей магистральной трубопроводной системы, состоящей из одного трубопровода, показана на рис.1. Здесь задвижка 1 предназначена для регулирования подачи целевого продукта в трубопровод; задвижка 2 – для регулирования подачи целевого продукта из трубопровода к потребителю. Её состояние «закрыто» позволяет держать под некоторым напором целевой продукт в трубопроводе. Состояния «закрыто» задвижки 1 и «открыто» задвижки 2 позволяют освободить самотёком трубопровод от целевого продукта для проведения профилактических или аварийных работ на трубопроводе. При этом потребитель лишён возможности частично или полностью получать целевой продукт в период проведения профилактических или аварийных работ на трубопроводе или задвижках.

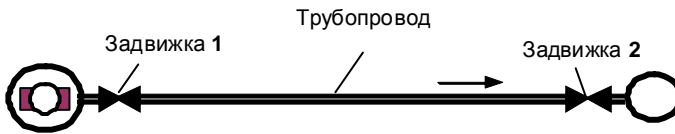


Рис.1 – Схема простейшей магистральной трубопроводной системы

Пусть трубопровод имеет надёжность  $p$ , а обе задвижки имеют одинаковую техническую надёжность, равную  $p_a$ . Тогда модель функциональной надёжности магистрального трубопровода будет иметь вид, показанный на рис.2.

Последовательная модель надёжности объясняется тем, что пользователь получает целевой продукт только тогда, когда работоспособны все элементы системы: и задвижки, и трубопровод. Потребитель лишён возможности получать целевой продукт в заданном количестве и заданного качества тогда, когда хотя бы один из элементов системы выйдет из строя.

Функциональная надёжность системы на рис.1, согласно модели на рис.2, определится выражением

$$P_1^f = p_a^2 \cdot p. \quad (1)$$

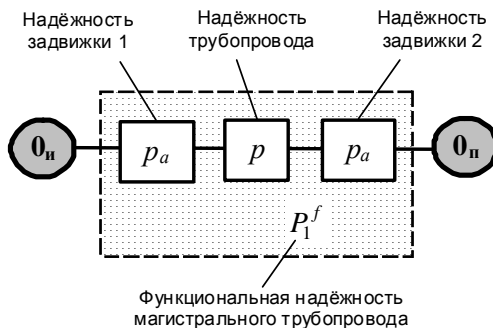


Рис.2 – Модель функциональной надёжности простейшего магистрального трубопровода

Типичная схема магистральной трубопроводной системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов, показана на рис.3. Здесь назначение задвижек 1 и 3 относительно трубопровода 1 и задвижек 2 и 4 относительно трубопровода 2 такое же, как у задвижек 1 и 2 на рис.3 соответственно. Однако потеря работоспособности трубопровода 1 и задвижки 3 или трубопровода 2 и задвижки 4 не приводит к прекращению доступа целевого продукта к потребителю.

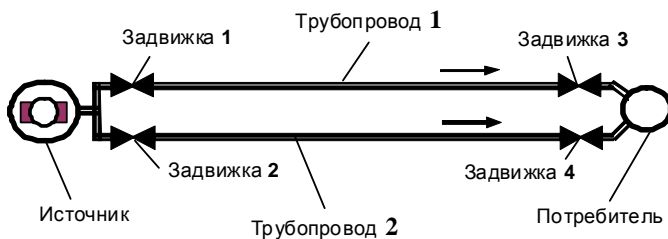


Рис.3 – Схема дублирования магистрального трубопровода

Параллельные трубопроводы могут иметь отличные друг от друга материал, диаметр, степень износа, квалификацию строителей и др. В связи с этим техническая надёжность одного из параллельных трубопроводов может отличаться от технической надёжности другого. В дальнейшем для упрощения расчётов будем считать, что оба трубопровода сооружались в одно и то же время, в одних и тех же условиях и имеют одинаковые технические параметры, т.е. техническая надёжность одного трубопровода равна технической надёжности другого.

Пусть каждый из трубопроводов 1 и 2 имеет техническую надёж-

ность  $p$ , а каждая из четырех задвижек 1, 2, 3 и 4 – техническую надёжность  $p_a$ . Тогда модель функциональной надёжности сети из двух параллельных трубопроводов будет иметь вид, показанный на рис.4.

Последовательная модель надёжности трубопровода 1 и задвижки 3 объясняется тем, что при проведении ремонтных работ на трубопроводе или задвижке целевой продукт через цепочку этих элементов не транспортируется. Цепочка работоспособна только тогда, когда оба элемента исправны. То же самое касается трубопровода 2 и задвижки 4.

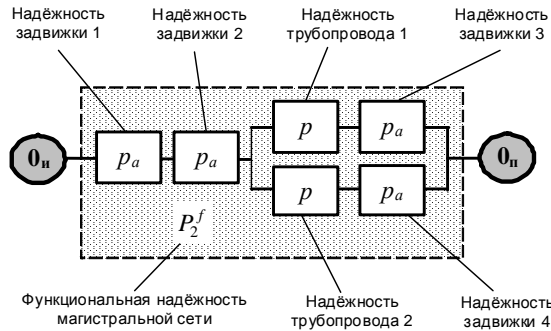


Рис.4 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с двумя параллельными трубопроводами

Параллельная модель надёжности цепочки из трубопровода 1 и задвижки 3 с цепочкой из трубопровода 2 и задвижки 4 объясняется тем, что целевой продукт может транспортироваться в системе до тех пор, пока хотя бы одна цепочка исправна. Только выход из строя обеих цепочек не позволяет потребителю получать целевой продукт.

Последовательная модель надёжности задвижек 1 и 2 с системой параллельных цепочек объясняется тем, что при выходе из строя хотя бы одной из этих задвижек или системы цепочек транспорт целевого продукта осуществляться не может. Система работоспособна только тогда, когда обе задвижки исправны, а параллельные цепочки позволяют транспортировать целевой продукт потребителю.

Функциональная надёжность системы на рис.3, согласно модели на рис.4, определяется выражением

$$P_2^f = p_a^2 \left[ 1 - (1 - p \cdot p_a)^2 \right]. \quad (2)$$

Аналогичное построение модели надёжности для трубопроводной сети из трёх параллельных трубопроводов (рис.5) приводит к расчёт-

ной формуле

$$P_3^f = p_a^3 \left[ 1 - (1 - p \cdot p_a)^3 \right]. \quad (3)$$

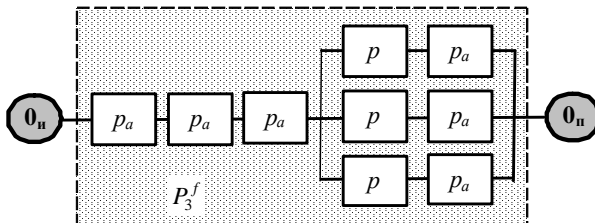


Рис.5 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с тремя параллельными трубопроводами

В общем случае, когда система состоит из  $n$  параллельных трубопроводов, её функциональная надёжность определяется выражением

$$P_n^f = p_a^n \left[ 1 - (1 - p \cdot p_a)^n \right]. \quad (4)$$

В случае высокой технической надёжности задвижек  $p_a \approx 1$  формула упрощается:

$$P_n^f = 1 - (1 - p)^n. \quad (5)$$

Эффект повышения функциональной надёжности магистральной сети за счёт резервирования трубопровода при различных значениях технической надёжности одного трубопровода  $p$  и различной степени резервирования  $n$  приведен в таблице.

Техн. надёжность трубопровода	Два параллельных трубопровода, $i=2$		Три параллельных трубопровода, $i=3$		Четыре параллельных трубопровода, $i=4$	
$p$	$P_2^f$	$k_2^f$	$P_3^f$	$k_3^f$	$P_4^f$	$k_4^f$
0,01	0,0199	1,99	0,0297	2,97	0,0394	3,94
0,1	0,19	1,9	0,271	2,71	0,3439	3,44
0,3	0,51	1,7	0,657	2,19	0,7599	2,533
0,5	0,75	1,5	0,875	1,75	0,9375	1,875
0,7	0,91	1,3	0,973	1,39	0,9919	1,417
0,9	0,99	1,1	0,999	1,11	0,9999	1,111
0,99	0,9999	1,01	0,999999	1,0101	0,99999999	1,010101

Данные в таблице получены в предположении, что  $p_a = 1$ . Табличные величины  $k_i^f$ ,  $i=2,3,4$ , представляют собой коэффициент повышения надёжности, показывающий во сколько раз увеличилась функцио-

нальная надёжность системы за счёт резервирования трубопровода.

Согласно таблице, наибольший эффект увеличения надёжности за счёт резервирования наблюдается при малой технической надёжности трубопроводов.

Поскольку  $\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = n$ , то функциональная

надёжность за счёт резервирования может быть увеличена не более, чем в  $n$  раз. Так, за счёт дублирования (два трубопровода) – не более, чем в два раза, за счёт двукратного резервирования (три трубопровода) – не более, чем в три раза; за счёт трёхкратного резервирования (четыре трубопровода) – не более, чем в четыре раза и т.д.

При высокой технической надёжности трубопровода ( $p \approx 1$ ) эффект повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования полностью отсутствует. Действительно, поскольку

$$\lim_{p \rightarrow 1} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = 1.$$

На рис.6, 7 приведены графики функциональной надёжности и коэффициентов  $k_i^f$ ,  $i=2,3,4$ , в зависимости от технической надёжности одного трубопровода  $p$ . Пунктирная линия на рис.6 соответствует условной функциональной надёжности системы  $p_1^f$ , т.е. надёжности системы при условии отсутствия резервирования (в системе всего один трубопровод). Пунктирная линия на рис.7 соответствует условному коэффициенту повышения надёжности  $k_i^f$  при том же условии. В этом случае  $k_i^f = 1 = \text{const}$ .

Графики на рис.6 наглядно показывают, что при значениях технической надёжности близких к нулю ( $p \approx 0$ ) и единице ( $p \approx 1$ ) прирост функциональной надёжности за счёт резервирования меньше, чем при значениях из среднего диапазона ( $0,05 \leq p \leq 0,95$ ). Так,

$$\Delta P_{p \approx 0,5}^f \gg \begin{cases} \Delta P_{p \approx 0}^f; \\ \Delta P_{p \approx 1}^f. \end{cases}$$

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при дублировании трубопровода достигается при  $p_2^* = 0,5$ . Здесь экстремальное значение  $p_2^*$  является решением задачи одномерной безусловной оптимизации:

$$p_2^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_2^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^2] - p \} \right].$$

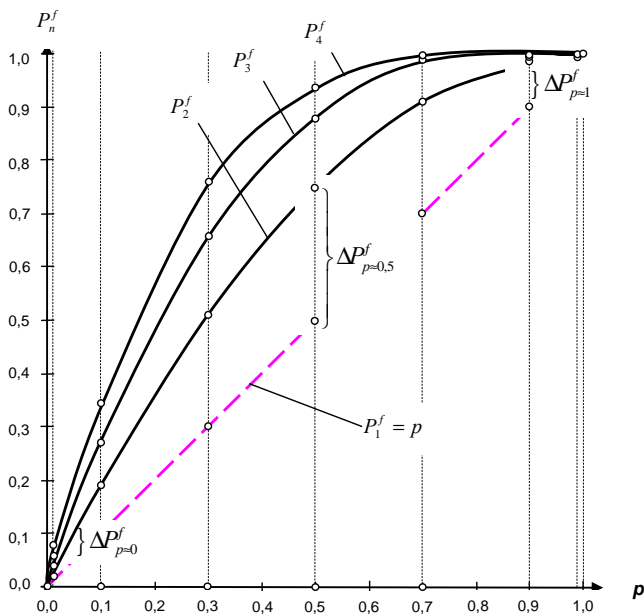


Рис. 6 – Графики зависимости функциональной надёжности системы трубопроводного транспорта с резервированием от вероятности технической надёжности трубопровода

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при двукратном резервировании (три параллельных трубопровода) достигается при  $p_3^* = 0,423$ . Здесь экстремальное значение  $p_3^*$  – это решение задачи одномерной безусловной оптимизации:

$$p_3^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_3^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^3] - p \} \right].$$

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при трёхкратном резервировании (четыре параллельных трубопровода) достигается при  $p_4^* = 0,37$ . Здесь экстремальное значение  $p_4^*$  является решением задачи одномерной безусловной оптимизации:

$$p_4^* = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} (P_4^f - p) \right] = \arg \left[ \max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^4] - p \} \right].$$

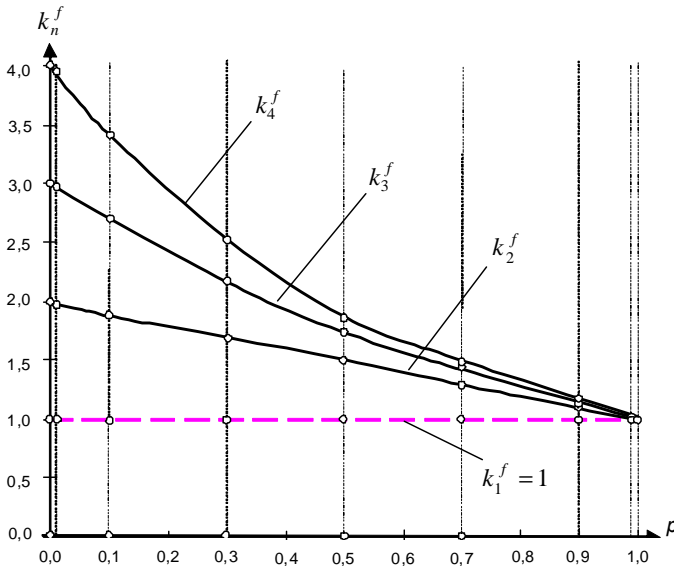


Рис.7 – Графики зависимости коэффициента повышения функциональной надёжности для системы трубопроводного транспорта с резервированием от вероятности технической надёжности трубопровода

Как видно, с ростом степени резервирования  $n$  максимальный эффект повышения функциональной надёжности достигается при всё меньших значениях технической надёжности трубопровода  $p$ :

$$p_4^* \leq p_3^* \leq p_2^*.$$

Таким образом, анализ графиков  $k_1^f(p)$  (рис.7) свидетельствует о слабой эффективности резервирования при высокой технической надёжности одного трубопровода, т.е. при  $(p \approx 1)$ . Если к тому же добавить, что на сооружение каждого дополнительного трубопровода расходуются ресурсы в количествах, соизмеримых с их расходами на сооружение основного трубопровода, то становится очевидным нецелесообразность сооружения более одного дополнительного трубопровода.

Наиболее важным результатом резервирования является возможность проводить профилактические и ремонтные работы на трубопроводах без прекращения поставки целевого продукта потребителю. А для достижения такого результата достаточно ограничиться дублированием основного трубопровода.



1.Самойленко Н.И., Гавриленко И.А. Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем / Под ред. Н.И.Самойленко. – Харьков: ХНАМГ; Горловка: ЧП «Вид-во Ліхтар», 2008. – 180 с.

2.Гавриленко И.А., Самойленко Н.И. Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.63. – К.: Техніка, 2005. – С.195-199.

3.Рудь И.А. Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.

4.Рудь И.А. Расчет надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.20. – К.: Техніка, 1999. – С.37-42.

5.Ильин Ю.А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

*Получено 10.12.2008*

УДК 621.3.032

К.К.НАМИТОВ, д-р техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПУСКРЕГУЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАЗРЯДНЫХ ЛАМП**

Приводится краткий упрощенный метод анализа теплового режима работы балластного дросселя, комплектов «РЛ - ПРА», который можно использовать в инженерной практике при проектировании.

Математически строгая постановка задач о тепловом режиме работы пускорегулирующих аппаратов (ПРА) приводит к нелинейным уравнениям нестационарной теплопроводности со сложными условиями однозначности [1-4].

Ниже концептуально рассматривается упрощенный подход к этой проблеме, приемлемый в инженерной практике.

В действующем аппарате выделение тепла связано с потерями электрической энергии на лент-джоулев нагрев токоведущих частей [1-3], на перемагничивание и вихревые токи в ферромагнитных частях. Тепло передается от одних частей аппарата к другим, отдается в окружающую среду. В результате возникает существенно неравномерное температурное поле, для различных точек которого характерна собственная динамика повышения температуры. После выхода аппарата на заданный рабочий режим за определенное время в нем устанавливается стационарное температурное поле, для каждой точки которого характерно определенное значение температуры.

Максимально допустимый перегрев аппарата устанавливается в